

文章编号: 1001-8360(2003)04-0019-04

# SSE 在电气化铁路列车运行模拟中的应用

丁勇<sup>1</sup>, 何天键<sup>2</sup>, 冯汝辉<sup>2</sup>, 刘海东<sup>1</sup>, 毛保华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北方交通大学 交通运输学院, 北京 100044; <sup>2</sup> 香港理工大学 电机系, 香港)

**摘 要:** 探讨了电气化铁路列车运行模拟中的关键问题, 开发了一套可供模拟计算与方案评价的电气化铁路列车运行模拟系统, 重点介绍了该系统的主体结构、计算流程与牵引供电计算的 SSE 算法设计。本文采用 Intel 处理器(Pentium III, Pentium IV)提供的 SSE(单指令多数据流扩展指令集)技术, 在 PC 机上实现了牵引供电的并行计算, 加快了计算速度, 使列车运行模拟系统的整体计算速度提高了两倍以上。

**关键词:** 列车运行模拟; 牵引供电计算; 计算机模拟; 并行算法; SSE

**中图分类号:** U 223. 2; U 260. 13 **文献标识码:** A

## Applications of SSE on electrified railway train operation simulation

DING Yong<sup>1</sup>, HO Tin-kin<sup>2</sup>, FUNG Yu-fai<sup>2</sup>, LIU Hai-dong<sup>1</sup>, MAO Bao-hua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Traffic and Transportation, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China;

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** This paper discusses the key issues about train operation simulation on electrified railways. A simulation system has been developed for computational simulation and scheme evaluation. As an emphasis, the paper introduces the system structure, flow chart and traction power supply model. The calculating of traction power supply is a CPU-intensive work. The Intel architecture processors (Pentium III, Pentium IV) introduces Streaming SIMD Extensions (SSE), that is an efficient execution model to accelerate the applications. The paper discusses the methods to accelerate the calculation of traction power supply. Main procedures have been redesigned by exploiting SIMD parallelism in the PC platform. Finally, the experimental results demonstrate that SSE can speed up the calculation of traction power supply. Compared with convention algorithm implementation, the parallel algorithm enhances performance about two times.

**Keywords:** train operation simulation; calculation of traction power supply; computer simulation; parallel algorithm; SSE

列车运行过程涉及到许多因素。列车运行模拟系统可以快速准确地计算分析列车在各种不同条件下的运行过程, 为铁路工程咨询、设计、运营部门提供分析决策的依据。文献[1~3]介绍了我国已经开发的一些列车运行模拟系统, 目前研制的模拟系统主要包括单列车与多列车两种。单列车模拟的重点在于牵引计算, 多列车模拟的重点是模拟在列车相互影响的条件下列车的运行情况。

与内燃牵引不同, 电力机车牵引力、动力制动力、

区段耗电量等都与受电弓处的网压密切相关。受电弓处网压随电力机车的取流大小和运行位置的改变而变化, 在多列车情况下, 还与同一供电臂上的其他列车的取流大小和所在位置相关联, 相互影响, 随时变化。要准确模拟电气化铁路区段的列车运行过程, 就必须根据列车的运行状态和位置进行实时地牵引供电计算。在求解列车牵引力、动力制动力的过程中, 需要计算牵引网中各节点(列车所在位置)的电压与电流。欲进行精确的计算是相当耗时的。这就是设计电气化铁路区段列车运行模拟系统的难点所在, 特殊之处。

本文采用 Intel 处理器提供的 SSE<sup>4</sup> 技术, 设计了

收稿日期: 2002-09-27; 修回日期: 2003-03-07  
基金项目: 交通运输系统模拟部级实验室开放课题(2001-01); 香港理工大学研究基金资助(EE/P00044)

作者简介: 丁勇(1974-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士研究生。

牵引供电的并行计算模型,并在 PC 机上予以实现,加快了列车运行模拟系统的整体计算速度。

### 1 电气化铁路列车运行模拟系统总体结构

电气化铁路列车运行模拟系统是在通用列车运行模拟与评价系统<sup>[5]</sup>的基础上,增加牵引供电计算模块。模拟系统主要进行运行模拟和方案评价两方面的工作。运行模拟部分是对列车运行的全过程进行模拟,并计算出列车运行过程中每一时间步长的速度、区间运行时分、能耗等;方案评价部分是根据用户需求,设计多种列车运行方案,并对列车在不同条件下的运行效果进行分析与评价。

#### 1.1 系统结构设计

模拟系统采用模块化结构,总体结构见图 1。“基础数据模块”包括线路设备子模块和机车车辆子模块两部分。线路设备子模块包括坡道、曲线、桥隧、车站、信号机、变电所、区间限速等数据;机车车辆子模块包括机车、车辆、列车编组以及机车工况曲线等数据。“模拟计算模块”是系统的主体,用户依据基础数据设计相应的列车运行方案,按照节时、节能、定时三种模拟策略,系统实时计算列车运行的全过程。“模拟显示模块”绘制线路及车站的模拟平、纵断面图,在计算机屏幕上实时显示出用户设计方案的列车运行情况。“图形数据输出模块”输出列车速度—距离曲线、速度—时分曲线、手柄位曲线、电流电压曲线等并以文本及 CAD 的形式保存计算结果。

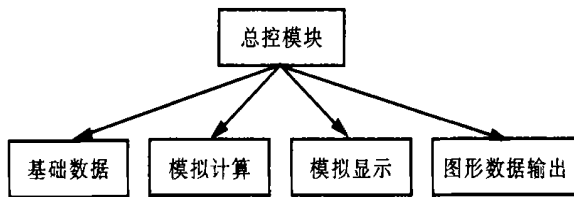


图 1 系统总体结构框架

电气化铁路列车运行模拟系统的主体流程图,见图 2。进行电气化铁路列车运行模拟时,用户首先通过设置模拟参数来设计相应的列车运行方案。模拟开始后,系统根据列车的位置、速度、线路的静态和动态限速等,确定列车的操作方式<sup>[6]</sup>。列车的操作方式包括牵引、惰行、制动以及停车。根据牵引网参数和列车操作方式、位置、速度等,建立运行区段的牵引供电网络模型,利用数值方法求解牵引供电网络方程,计算出变电所的负荷及每个列车的电流、受电弓处电压。根据列车的速度、操作方式以及牵引供电计算得到的列车电流、受电弓处电压求得相应的牵引力、列车合力、

加速度,进而得到列车在时间步长末的速度和位置,然后进行下一个步长循环。

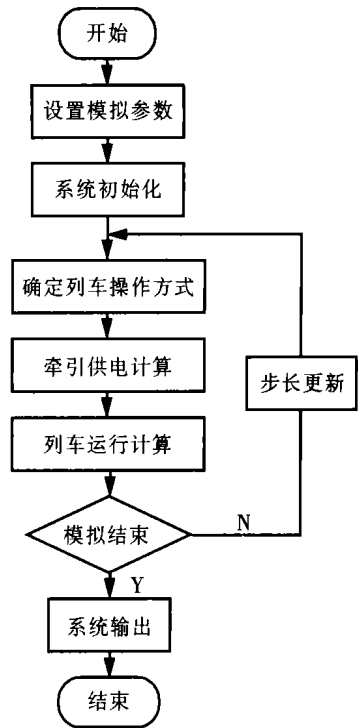


图 2 模拟系统主体流程图

#### 1.2 牵引供电计算模型

进行牵引供电计算,首先要建立相关的网络模型<sup>[7]</sup>。牵引供电网络的建立与铁路线路、牵引变电所、列车等因素有关。牵引变电所和列车是构成牵引供电网络的两种主要节点。目前,我国电气化铁路主要供电方式有带回流线的直接供电方式、AT 供电方式和 BT 供电方式等<sup>[8]</sup>。供电方式的不同,对网络拓扑结构没有影响,只影响节点导纳矩阵的构成。图 3 为牵引供电网络模型图。

牵引供电网络节点方程的矩阵形式为

$$YV = I \tag{1}$$

式中,  $I$  为节点电流列向量,为已知量;  $V$  为节点电压列向量,为待求量;  $Y$  为节点导纳矩阵。

通过求解方程(1),就可计算出各变电所的负荷和各列车受电弓处的网压。

### 2 基于 SSE 的算法设计

PC 最常用的 Intel 处理器(Pentium III、Pentium IV)提供了 SSE 技术,支持四个单精度浮点数的 SIMD 运算、高速缓冲控制等,其内部还新增 8 个 128 位寄存器,存储 PSF(Packed Single-precision Floating-point)数据<sup>[9]</sup>。PSF 类型数据是 SSE 支持的一种压缩单精度浮点类型数据,它将四个单精度浮点数打包而

成。SSE 的浮点 SIMD 并行运算可表示为图 4, 运算符  $op$  可为加、减、乘、除、逻辑、比较等。

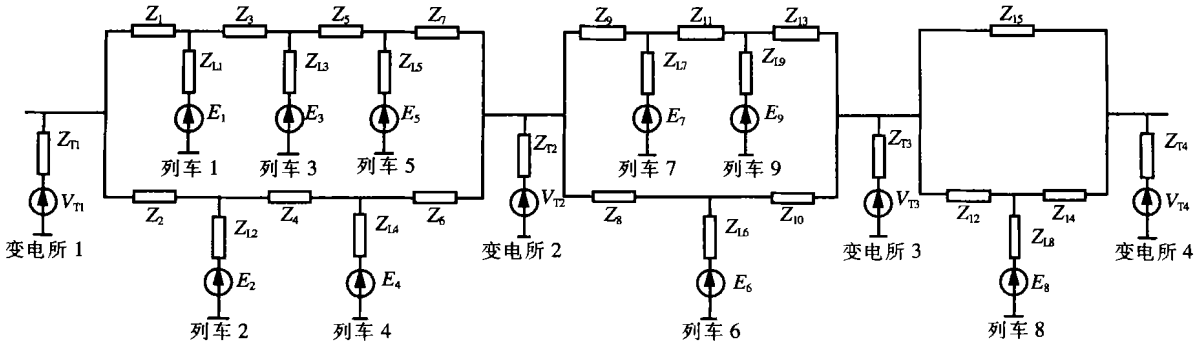


图 3 牵引供电网络模型图

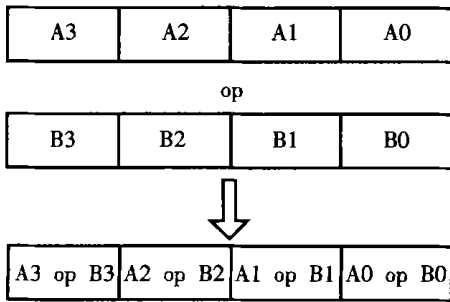


图 4 SSE 的浮点 SIMD 并行运算

利用 SSE 在单处理器上就可实现并行计算, 因此, 基于 SSE 的并行算法拥有十分广泛的应用基础。本文采用 SSE 技术, 对牵引供电计算模型进行 SIMD 并行化, 依照线性代数中的习惯写法, 将电气化铁路牵引供电网络的节点方程 (1) 写成如下矩阵方程组的形式

$$Ax = b \quad (2)$$

式中,  $A$  为方程的系数矩阵;  $b$  是已知向量;  $x$  是未知向量或称解向量。

求解方程组 (2) 的常用方法是 LU 分解<sup>[9]</sup>, 对  $n$  阶矩阵  $A$  可以通过 LU 分解成一个下三角矩阵  $L$  和一个上三角矩阵  $U$  的乘积, 即

$$LUx = b \quad (3)$$

采用前代过程和回代运算求解  $x$

$$Lx' = b \quad (4)$$

$$Ux = x' \quad (5)$$

当矩阵  $L$  和  $U$  计算得到后, 通过前代过程 (4) 可以确定中间变量  $x'$ , 然后通过回代运算 (5) 求解出向量  $x$ 。LU 分解中,  $n$  阶矩阵  $A$  中的元素  $a_{ij}$  可按下式计算

$$a_{ij} - \frac{a_{ik} \times a_{kj}}{a_{kk}} = a_{ij} \quad (6)$$

计算流程

For( $k=0; k < n-1; k++$ ) / \* 外循环 \*/

For( $i=k+1; i < n; i++$ ) / \* 中循环 \*/

$a_{ik} = a_{ik} / a_{kk}$  / \* 规格化 \*/

For( $j=k+1; j < n; j++$ ) / \* 内循环 \*/

$a_{ij} = a_{ij} - a_{ik} \times a_{kj}$  / \* 消去运算 \*/

SSE 能够快速处理 PSF 类型数据, 因此, 须将牵引供电计算数据按 PSF 类型组织。大多数牵引供电结果为单精度浮点类型, 系统采用 SSE 计算出的结果能达到要求。运算过程中, 中间变量采用 PSF 类型数据, 并按照 16 字节的边界对齐<sup>[4]</sup>。在 LU 分解过程中, 矩阵  $A$  中的元素, 沿对角线  $a_{ij}$  代表的的数据一行行计算, 而  $a_{kj}$  代表的的数据一列列计算。在每一次内循环中, 每一行及每一列的数据均存储为 PSF 类型数据, 每一次消去运算可同时处理四个数据, 达到了很高计算效率。 $a_{ik}$  则看成一个常数, 复制四遍后, 也存储为 PSF 类型数据。基于 SSE 的 LU 分解算法可表示为

$$\begin{bmatrix} a_{i,j} \\ a_{i,j+1} \\ a_{i,j+2} \\ a_{i,j+3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{ik}/a_{kk} \\ a_{ik}/a_{kk} \\ a_{ik}/a_{kk} \\ a_{ik}/a_{kk} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{k,j} \\ a_{k,j+1} \\ a_{k,j+2} \\ a_{k,j+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i,j} \\ a_{i,j+1} \\ a_{i,j+2} \\ a_{i,j+3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

计算流程

F32vec4 C, A1, A2; / \* PSF 类型数据 \*/

For ( $k=0; k < n-1; k++$ ) { / \* 外循环 \*/

For ( $i=k+1; i < n; i++$ ) { / \* 中循环 \*/

$a_{ik} = a_{ik} / a_{kk}$  / \* 规格化 \*/

-mm-load-ps1(C,  $a_{ik}$ ); / \* 将  $a_{ik}$  复制四遍后存储到 C 中 \*/

For ( $j=k+1; j < n; j+=4$ ) { / \* 内循环 \*/

-mm-load-ps (A1,  $a_{kj}$ ); / \* 将  $a_{kj}$  到  $a_{k,j+3}$  的四个数据存储到 A1 中 \*/

-mm-load-ps (A2,  $a_{ij}$ ); / \* 将  $a_{ij}$  到  $a_{i,j+3}$  的四个数据存储到 A2 中 \*/

A2=A2-(A1×C); / \* 消去运算 \*/

-mm-store-ps ( $a_{ij}$ , A2); } } / \* 将 A2 存储回  $a_{ij}$  到

$a_{i,j+3}$  的四个数据中  $*$  /

在前代过程中, 式(4)可化解为

$$x'_i = b_i - \sum_{j=1}^{i-1} x'_j \times L_{ij} \quad (8)$$

SSE 算法同样可以应用在  $x'_j \times L_{ij}$  中。每次循环时,  $x'_j$  和  $L_{ij}$  中的四个数据可以存储在 2 个不同的 PSF 类型数据中进行乘法运算。而在回代运算中, 式(5)可表示为

$$x_j = \frac{1}{U_{ij}} [x'_j - \sum_{n=j+1}^m x_n \times U_{jn}] \quad (9)$$

同前代过程相类似, 在  $x_n \times U_{jn}$  计算过程中, 每次循环时,  $x_n$  和  $U_{jn}$  中的四个数据也可以存储在 2 个不同的 PSF 类型数据中进行乘法运算。

### 3 结果分析

按上述算法, 本文利用 Intel<sup>®</sup> SSE C/ C++ 开发工具, 采用内在指令函数、向量类库<sup>[10]</sup> 两种方式开发了模拟系统。内在指令函数与相应的 SSE 指令一一对应, 以 C/C++ 函数形式来使用 SSE 指令。基于 SSE 的算法可以实现四个单精度浮点数的 SIMD 并行, 在理想状况下, 加速比最大可以达到 4.0。但实际很难达到这样高, 主要原因除了与计算中的可 SIMD 并行度有关, 还与其他因素, 如内存大小、算法优化程度等有关。所以, 系统在实现过程中, 依据 Intel<sup>®</sup> 处理器的体系结构, 采用了零元素判断、循环展开<sup>[10]</sup>、地址运算等优化技术。在牵引供电计算模块, 节点方程求解过程中的 LU 分解是主要的耗时部分, 表 1 反映了 SSE 在 LU 分解中的应用效果(所有的实验数据都是在主频 733 MHz 的 Pentium III 计算机上测定)。

表 1 LU 分解的计算时间比较

	矩阵阶数					
	50	100	150	200	250	300
非 SSE 计算/ms	0.66	5.15	17.50	52.94	175.90	292.48
SSE 计算/ms	0.22	1.59	5.23	20.16	83.90	143.74
加速比	3.00	3.24	3.35	2.63	2.10	2.04

从表 1 中可以看出: 矩阵阶数在 200 以下时, 有很好的加速效果, 最大的加速比达到了 3.35, 已经接近了 4.0 理论值。当矩阵阶数超过 200 后, 加速比有所下降, 但也能保持在 2.0 以上, 说明应用 SSE 显著提高了 LU 分解的计算速度。表 2 反映了应用 SSE 前后, 列车运行模拟系统的计算时间比较。

四种模拟方案是指在同一区段内, 列车数目不同但编组内容相同的多个列车运行情况。模拟方案一有

5 个列车, 模拟方案二有 10 个列车, 模拟方案三有 15 个列车, 模拟方案四有 20 个列车。从表 2 中可以看出, 使用 SSE 后, 系统整体运行速度得到了有效提高。当系统模拟过程中列车较多, 系数矩阵阶数较大时, SSE 的加速效果更为显著。

表 2 列车运行模拟系统的整体计算时间比较

	非 SSE 计算	SSE 计算	加速比	矩阵阶数
	/min	/min		
模拟方案一	3.45	2.25	1.53	102
模拟方案二	7.15	2.78	2.57	132
模拟方案三	13.07	6.70	1.95	162
模拟方案四	27.28	10.75	2.54	192

### 4 结论

本文采用 Intel<sup>®</sup> 处理器提供的 SSE 技术, 在 PC 机上实现了牵引供电的并行计算, 加快了计算速度, 使列车运行模拟系统的整体计算速度提高了两倍左右。目前该系统已开发完毕, 于 2002 年 4 月通过铁道部鉴定, 被北京城市建筑设计研究院、铁道第一、二、三、四勘察设计院等多家设计部门采用, 取得了良好的经济效果。

参考文献:

- [1] 刘云. 列车运行仿真系统的建模与实现[J]. 铁道学报, 1995, 17(专辑): 20—26.
- [2] 赵明, 汪希时. 移动闭塞条件下列车追踪运行控制研究[J]. 铁道学报, 1997, 9(3): 61—68.
- [3] 田长海, 梁洪忠, 等. 列车动态模拟系统的研究[J]. 中国铁道科学, 1995, 16(1): 14—26.
- [4] Intel Corporation. Intel C/C++ Compiler Class Libraries for SIMD Operation User's Guide[EB/OL]. <http://developer.intel.com/design/pentium4/manuals>.
- [5] 毛保华, 何天键, 等. 通用列车运行模拟软件系统研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(1): 1—6.
- [6] 饶忠. 列车牵引计算[M]. 第二版. 北京: 中国铁道出版社, 2002. 4—56.
- [7] Mellit B, Goddman C J. Simulator for studying operational and power supply conditions in rapid-transit railways[J]. IEE Proc., 1978, 125(4): 298—303.
- [8] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 牵引供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988. 9—10.
- [9] 李学杨等. 数值分析[M]. 第四版. 北京: 清华大学出版社, 2001. 10—25.
- [10] Intel Corporation. Intel<sup>®</sup> Pentium 4 Processor Optimization Reference Manual[EB/OL]. <http://developer.intel.com/design/pentium4/manuals>.

(责任编辑 张 珂)